

06.2;06.3

О возможности применения нитрида индия в термофотовольтаике

© С.В. Шутов, Э.С. Аппазов

Херсонский государственный технический университет, Украина
E-mail: eappazov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 12 августа 2003 г.

Оценена эффективность применения нитрида индия для термофотовольтаических преобразователей. Результаты расчета свидетельствуют о преимуществах преобразователей, изготовленных из InN, по сравнению с преобразователями из GaSb при эксплуатации в условиях повышенных температур.

Относительно недавно установленное истинное значение ширины запрещенной зоны нитрида индия [1,2], ранее считавшегося типичным широкозонным полупроводником, позволяет взглянуть по-новому на сферы его применения.

Значительно более низкое значение ширины запрещенной зоны InN ($E_g \approx 0.7 \text{ eV}$ при 300 K) позволяет рассчитывать на возможность использования этого материала для изготовления фотоприемников ИК-диапазона. В настоящей работе мы выполним оценки эффективности применения нитрида индия в качестве материала для термофотовольтаических (ТФВ) преобразователей. Необходимо сразу отметить, что доступные в настоящее время экспериментальные данные по оптическим и электрическим свойствам InN относятся к тому периоду, когда нитрид индия считался еще широкозонным. В этой связи основой расчетных моделей был выбран общий термодинамический подход, успешно применяемый для определения предельных значений эффективности солнечных элементов [3]. Эффективность ТФВ-преобразователя определялась по формуле

$$\eta = \frac{E_{\max} \cdot I_{ph}}{q \cdot E_c},$$

где

$$E_m \approx q \left(U_{id} - \frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{qU_{id}}{AkT} + 1 \right] - \frac{AkT}{q} \right); \quad U_{id} \approx \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right)$$

(U_{id} — напряжение холостого хода).

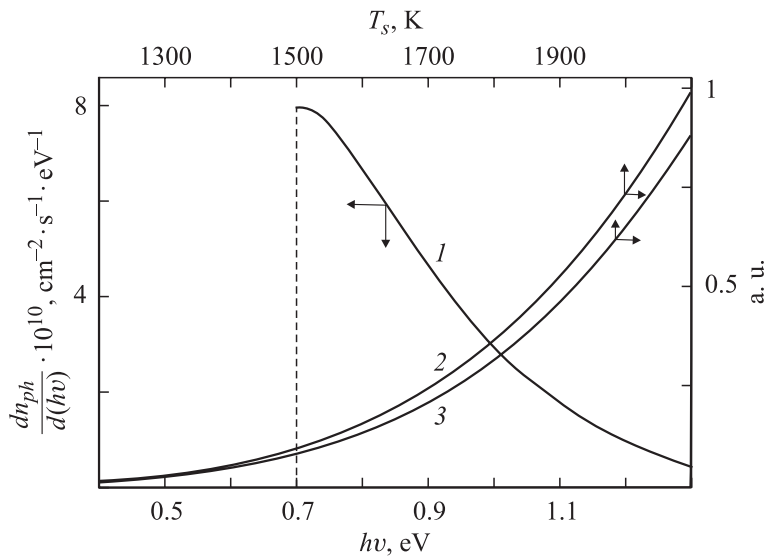


Рис. 1. Спектральное распределение плотности потока фотонов модельного источника излучения (1) ($T = 1973$ К) и зависимость доли излучения источника, приходящейся на тепловые потери от температуры АЧТ для ТФВ-преобразователей: GaSb (2), InN (3).

Модельным источником ИК-излучения служило абсолютно черное тело (АЧТ) с идеальным селективным фильтром, отражающим все фотоны с $h\nu < E_g$. Полная поверхностная плотность излучения E_c и фототок I_{ph} определялись из спектрального распределения плотности фотонов $\frac{dn_{ph}}{d(h\nu)}$ модельного источника, приведенного на рис. 1 (кривая 1). Ток насыщения I_0 определялся по формуле [4]:

$$I_0 = \frac{q(n^2 + 1)E_g^2 kT}{4\pi^2 \hbar^3 c^2} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right).$$

Предполагалось, что поглощение каждого фотона с энергией в интервале $E_g \leq h\nu \leq E_g + 0.1$ (eV) сопровождается рождением электрона фотопроводимости, а фотоны с энергией $h\nu > E_g + 0.1$ (eV) поглощаются кристаллической решеткой, увеличивая температуру полупроводникового материала. Для сравнения по этой же модели были

выполнены расчеты для преобразователя на основе антимонида галлия, который успешно используется в термофотовольтаике. Зависимости тепловых „потерь“ в материале ТФВ-преобразователя от температуры АЧТ для InN и GaSb приведены на рис. 1 (кривые 3 и 2 соответственно).

Реальные условия эксплуатации ТФВ-элементов связаны с повышенными плотностями потоков энергии, подобно тому, как и в случае преобразователей концентрированного солнечного излучения. Поэтому нам представляется корректным подход к определению вклада различных параметров фотопреобразователя в температурную зависимость эффективности, предложенный в [5]. В первом приближении считали, что зависимость η от температуры полностью определяется характером изменения функции $\frac{dU_{id}}{dT} = -\frac{1}{T}(E_g - U_{id})$. Принимали также, что $E_g(T)$ — константа как для GaSb, так и для InN в интервале температур 300 ÷ 400 К (в настоящее время зависимость $E_g(T)_{\text{InN}}$ нам не известна). Такое допущение не изменяет характера зависимости $\eta(T)$, так как уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводника при повышении температуры ТФВ-преобразователя приводит к незначительному изменению фототока I_{ph} , которое практически полностью компенсируется соответствующим ростом I_0 . При расчетах использовали следующие параметры: $A = 1.5$, $E_{g\text{GaSb}}^{300\text{K}} = 0.70$ eV, $E_{g\text{InN}}^{300\text{K}} = 0.72$ eV, $n_{\text{GaSb}} = 3.79$ [6], $n_{\text{InN}} = 2.0$ [7].

Рис. 2 иллюстрирует температурные зависимости нормализованного к η при 300 К к.п.д. для ТФВ-преобразователей из InN и GaSb для рассмотренной модели источника излучения с $T_s = 1973$ К. Приведенные результаты показывают более слабую зависимость $\eta(T)$ для InN по сравнению с $\eta(T)_{\text{GaSb}}$. Это особенно важно, если учесть, что с увеличением T_s , растет и доля фотонов, поглощаемых кристаллами и не приводящих к генерации носителей заряда, участвующих в фототоке (причем для GaSb она всегда больше (рис. 1, кривые 2 и 3)). ТФВ-преобразователь на основе GaSb нагревается при этом значительно, так как его теплопроводность ниже теплопроводности InN ($\kappa = 0.35$ [5] и $\kappa = 0.45$ [7] W/(cm · K) соответственно), а коэффициент теплопроводности сапфира, на котором обычно выращивают эпитаксиальные слои InN, составляет ≈ 1.0 W/(cm · K) [8]. Из сопоставления температурных зависимостей эффективностей преобразователей на основе InN и GaSb при различных температурах излучателя установлено, что в исследованном температурном интервале эксплуатации ТФВ-элементов наблюдается зависимость температуры T_i ,

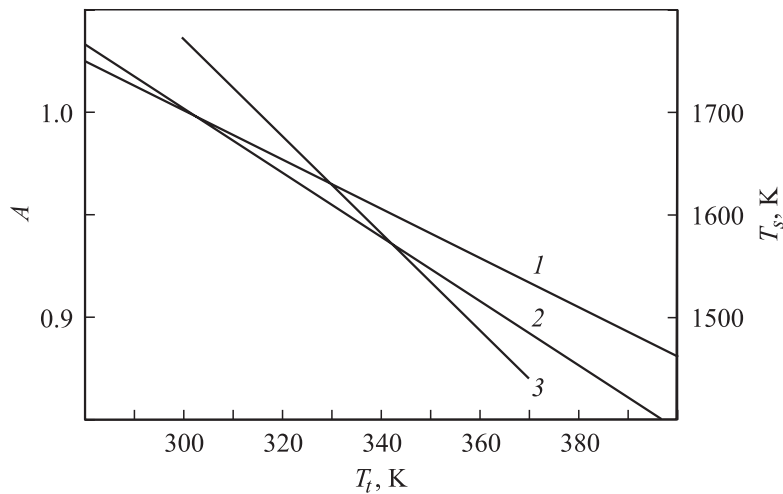


Рис. 2. Зависимость нормализованной к к.п.д. (A) при 300 К эффективности ТФВ-преобразователей из InN (1), GaSb (2) и T_t от температуры излучателя T_s (3).

начиная с которой абсолютные значения к.п.д. ТФВ-преобразователя на основе InN превышают аналогичные для ТФВ-преобразователя из GaSb, от температуры излучателя. Соответствующий график $T_t = f(T_s)$ также приведен на рис. 2.

В заключение отметим, что полученные зависимости $\eta(T)$ качественно согласуются с данными других авторов (например, [9]) и не противоречат экспериментальным данным [10]. В целом, приведенные результаты расчета свидетельствуют о преимуществах ТФВ-преобразователей на основе нитрида индия при повышенных температурах эксплуатации.

Список литературы

- [1] Davydov V.Yu., Klochikhin A.A., Emtsev V.V. et al. // Phys. Stat. Sol. (b). 2002. V. 233. N 3. P. R10–R11.
- [2] Davydov V.Yu., Klochikhin A.A., Emtsev V.V. et al. // Phys. Stat. Sol. (b). 2002. V. 234. N 3. P. 787–795.

- [3] *Андреев В.М., Грихилес В.А., Румянцев В.Д.* Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 309 с.
- [4] *Henry C.H.* // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 3. P. 4494–4500.
- [5] *Fan J.C.G.* // Solar cells. 1986. V. 17. P. 309–315.
- [6] *Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Т. 3. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 728 с.*
- [7] *Tyagai V.A., Evstigneev A.M., Krasiko A.N. et al.* // Sov. Phys. Semicond. 1977. V. 11. P. 1257–1259.
- [8] *Krukowski S., Witek A., Adamczyk J. et al.* // Phys. Chem. Solids. 1998. V. 59. P. 289–295.
- [9] *Luther J., Stollwerck G., Zenker M.* // Proc. of the 10th Workshop on QUANTSOL'98. March 8–14, 1998. Bad Hofgastein. Austria. http://www.esqsec.unibe.ch/pub_22htm.
- [10] *Ballard I., Barnham K.W.J., Nelson J. et al.* // Proc. 2th World Conf. And Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. 6–10 July 1998. Vienna, Austria. P. 3624–3628.